

Способ Контроля Акустической Нагрузки

Владимир Н. Хмелев, Роман В. Барсуков, Дмитрий В. Генне, Денис С. Абраменко, Евгений В. Ильченко

Бийский технологический институт (филиал) Алтайского технического университета им. И.И. Ползунова.

Аннотация – Рассмотрены вопросы косвенного определения параметров, напрямую связанных с величиной и характером акустического сопротивления сред подвергаемых ультразвуковому воздействию. Предлагаемый способ контроля параметров акустических сред основан на контроле электрических параметров ультразвуковых колебательных систем, которые непосредственно контактируют с обрабатываемыми технологическими средами.

Ключевые слова – Ультразвук, ультразвуковые генераторы, акустическая нагрузка, контроль.

I. ВВЕДЕНИЕ

Современные ультразвуковые электронные генераторы представляют собой устройства, обеспечивающие не только преобразование энергии электрической сети в энергию электрических колебаний ультразвуковой частоты для питания колебательных систем, но оптимизацию условий передачи энергии от колебательных систем в обрабатываемые среды. Необходимость обеспечения заданного или максимального энергетического воздействия на различные по своим свойствам и изменяющиеся в процессе обработки технологические среды, обуславливает необходимость контроля процессов, протекающих в технологических средах по действием ультразвуковых колебаний высокой интенсивности.

Все технологические среды, подвергаемые в ходе реализации различных процессов ультразвуковому воздействию, можно условно разделить на три группы. Это жидкие, твердые, газообразные среды или их комбинации, например: «жидкость-твердое тело», «жидкость-газ» и т.п. При обеспечении вывода ультразвуковой энергии в любую технологическую среду, эту среду следует рассматривать как акустическую нагрузку на колебательную систему и ультразвуковой технологический аппарат (УЗТА). К основным акустическим характеристикам сред относят скорость звука, плотность, волновое сопротивление, вязкость, упругость, коэффициент затухания ультразвуковых (УЗ) колебаний. Необходимо учитывать также, что характеристики сред при ультразвуковом воздействии не остаются постоянными.

Поскольку ультразвуковые колебательные системы (УЗКС) непосредственно контактирует с обрабатываемой средой, излучая в нее колебания, свойства УЗКС, такие как резонансная частота, механическая добротность, входной электрический импеданс, будут зависеть от свойств обрабаты-

ваемых сред. В общем случае, любая технологическая среда будет представлять для колебательной системы комплексную нагрузку, активная часть которой обусловлена преимущественно внутренним трением частиц среды, а реактивная обусловлена упругими и инерционными свойствами обрабатываемых сред [2].

II. ВЛИЯНИЕ АКУСТИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ НА ПАРАМЕТРЫ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Оптимальное согласование элементов, составляющих систему энергопереноса «генератор-УЗКС-технологическая среда», обеспечивает максимальное по эффективности преобразование и введение ультразвуковой энергии в технологические среды. На практике, оптимизация согласования, соответствует максимальной эффективности (производительности) работы УЗ установок и реализуемых в УЗ поле технологических процессов.

Однако, при реализации технологических процессов с использованием технологических сред с различными физическими свойствами (вода, масло, смолы и т.д.), свойства которых изменяются (например, при получении эмульсий путем смешивания двух различных жидкостей, снижении вязкости смол и масел при росте температуры, изменении дисперсности наполнителей при их диспергировании и т.п.), эффективность ультразвукового воздействия может существенно изменяться. Поскольку величина и характер акустической нагрузки (технологической среды) существенно меняются при неизменных параметрах цепи согласования электронного генератора с УЗКС, условия оптимального согласования генератор-УЗКС нарушаются, что и объясняет снижение эффективности УЗ воздействия.

Как правило, согласование УЗКС с выходным каскадом электронного генератора осуществляется при помощи высокочастотного (ВЧ) трансформатора (Т) и компенсационной индуктивности (L), включенной последовательно с пьезоэлектрическим преобразователем (Z), [1] как показано на рис. 1.

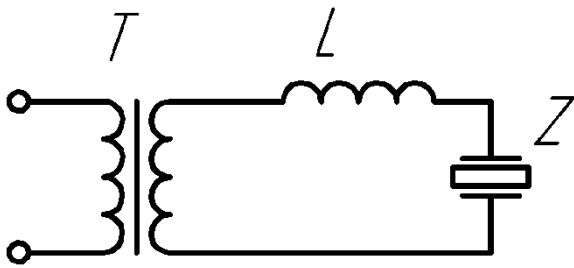


Рис. 1. Согласование УЗКС с выходом электронного генератора

Первоначальная настройка согласующих звеньев происходит на этапе настройки генератора и не учитывает всех возможных изменений характеристик и состояний среды, в процессе ее обработки, а без контроля этих изменений невозможно оптимизировать процесс и непрерывно контролировать состояние обрабатываемых технологических сред.

В связи с этим, возникает необходимость непрерывного контроля параметров акустической нагрузки (контроля параметров обрабатываемой среды) и включения в состав создаваемых УЗ технологических аппаратов систем контроля с перестраиваемыми системами согласования генератора и УЗКС[3].

Наличие системы контроля параметров (состояния) обрабатываемых сред позволит контролировать процессы, протекающие в непосредственной близости от излучающей поверхности колебательной системы (где не представляется возможным размещение датчиков), например, контролировать процессы формирования зоны сварки, степень развитости кавитации при обработке жидкостей высокоинтенсивными колебаниями, величину заглубления инструмента при УЗ размерной обработке хрупких материалов, степень смешивания двух жидких фаз с отличающимися свойствами при образовании эмульсий и т.п.

Таким образом, наличие зависимости параметров пьезоэлектрических ультразвуковых колебательных систем от свойств обрабатываемых сред делает возможным практическую реализацию контроля параметров сред путем непрерывного измерения электрических параметров УЗКС.

Для выявления электрических параметров УЗКС, наиболее полно и достоверно отражающих состояние обрабатываемых технологических сред следует проанализировать процесс формирования УЗ колебаний и их введения в технологические среды.

III. ВЫЯВЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ОТ ХАРАКТЕРИСТИК ОБРАБАТЫВАЕМЫХ СРЕД

Влияние величины и характера акустической нагрузки на параметры УЗКС удобно исследовать при помощи модели, представляющей собой электрические эквивалентные схемы УЗКС, работающей в режиме нагрузки.

На рис. 2,а представлена электрическая эквивалентную схему замещения колебательной системы с пьезоэлектрической

колебательной системой, справедливая в окрестностях ее резонансной частоты [2].

На эквивалентной схеме индуктивность L_m эквивалентна колеблющейся массе системы, емкость C_m – гибкости, активное сопротивление R_p – сопротивлению механических потерь, R_s – сопротивлению излучения колебательной системы, C – электрическая (статическая) емкость преобразователя, R_d – диэлектрические потери в пьезоматериале. Сопротивление механических потерь обусловлено внутренним трением частиц материала при колебаниях, а также потерями механической энергии в местах крепления колебательной системы. Сопротивление излучению определяется параметрами системы и пропорционально волновому сопротивлению среды. Электрическая емкость C пьезопреобразователя обусловлена геометрическими размерами и диэлектрической проницаемостью используемых пьезокерамических элементов.

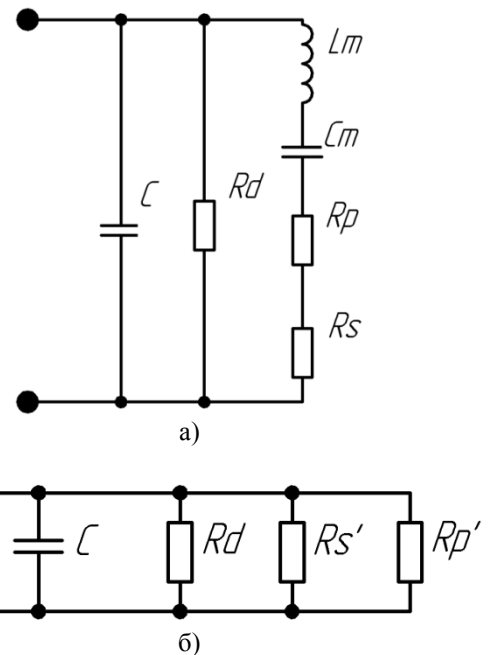


Рис. 2. Эквивалентная схема пьезоэлектрической колебательной системы а) вблизи резонансной частоты; б) на резонансной частоте.

На резонансной частоте механического колебательного контура (L_m, C_m) эквивалентная схема системы преобразуется к виду, представленному на рис. 2,б.

Здесь R_s' и R_p' – сопротивления, приведенные к параллельной схеме [2]. Приведенная эквивалентная схема не учитывает наличие нагрузки (обрабатываемой среды).

На рис. 3 представлена эквивалентная схема УЗКС, учитывающая влияние обрабатываемой среды. В этой эквивалентной схеме элементы C, R_d, R_s, R_p определяются свойствами УЗКС, а C', R_d', R_s', R_p' определяются акустической нагрузкой.

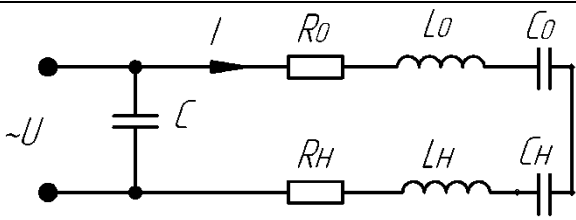


Рис. 3. Эквивалентная схема пьезоэлектрической колебательной системы учитывающая влияние нагрузки

Из анализа модели следует, что акустическая нагрузка УЗКС имеет как активную составляющую, представленную на схеме элементом R_H , так и реактивную составляющую, представленную на схеме элементами L_H и C_H , которые обусловлены как свойствами обрабатываемой среды так и геометрией рабочего объема.

Таким образом, при наличии акустической нагрузки и изменении ее величины или характера, нарушаются условия передачи энергии от генератора к обрабатываемой среде. Возможность определения численного значения элементов R_H , L_H , C_H , позволит контролировать, с одной стороны процессы, протекающие в УЗ поле, с другой стороны производить корректировку параметров согласующих элементов УЗТА.

Электрический ток, протекающий по элементам R_0 , L_0 , C_0 и R_H , L_H , C_H принято называть током механической ветви. Его величина прямо пропорциональна амплитуде механических колебаний, а амплитудно- и фазочастотные характеристики соответствуют частотным характеристикам УЗКС как механической колебательной системы.

Для определения параметров системы контроля необходимо знание диапазонов возможного изменения параметров обрабатываемых сред и контролируемых электрических параметров.

IV. РАСЧЕТ ЗНАЧЕНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ ЭКВИВАЛЕНТНОЙ СХЕМЫ УЗКС

Расчет элемента R_0 , определяющего собственные потери ультразвуковой колебательной системы, осуществляется при помощи выражения:

$$R_0 = \frac{U^2}{I^2} \quad (1)$$

где U и I напряжение на пьезоэлементах и ток механической ветви, измеренные при работе УЗКС без нагрузки на резонансной частоте.

Индуктивный элемент L_0 определяется из выражения:

$$L_0 = \frac{U^2}{I^2 \omega^2} \quad (2)$$

где Q_0 - добротность УЗКС при отсутствии акустической нагрузки (собственная добротность УЗКС). Выполнив подстановку в (2) с учетом выражения (1) получим конечное выражение:

$$L_0 = \frac{R_0}{\omega^2} \quad (3)$$

Используя формулу Томпсона $C_0 = \frac{1}{\omega^2 L_0}$, выразим C_0 :

$$C_0 = \frac{L_0 \omega^2}{1} \quad (4)$$

Выполнив подстановку в выражение (4) получим конечное выражение для C_0 :

$$C_0 = \frac{R_0}{\omega^2} \quad (5)$$

В режиме акустической нагрузки суммарное активное сопротивление механической ветви определяется как:

$$R_{\Sigma} = R_0 + R_H \quad (6)$$

где U_m - напряжение на пьезоэлементах УЗКС и ток механической ветви измеренные при работе УЗКС в режиме акустической нагрузки на резонансной частоте. Конечное выражение для элемента R_H определяется как:

$$R_H = R_{\Sigma} - R_0 \quad (7)$$

Суммарная индуктивность механической ветви для случая работы в режиме акустической нагрузки определяется как:

$$L_{\Sigma} = \frac{U_m}{I \omega} \quad (8)$$

где Q_{Σ} - добротность УЗКС измеренная в режиме акустической нагрузки.

Конечное выражение для индуктивности, определяемой акустической нагрузкой определяется как:

$$L_H = L_{\Sigma} - L_0 \quad (9)$$

Суммарная емкость механической ветви определяется из выражения:

$$C_{\Sigma} = \frac{1}{\omega^2 L_{\Sigma}} \quad (10)$$

Конечное выражение для емкости определяемой акустической нагрузкой определяется как:

$$C_H = C_{\Sigma} - C_0 \quad (11)$$

Собственная добротность УЗКС Q_0 и добротность УЗКС в нагруженном режиме Q_{Σ} можно определить исходя из амплитудно-частотных характеристик тока механической ветви, полученных в режиме холостого хода и режиме нагрузки. На рис. 4 представлены АЧХ тока механической ветви для случая ненагруженной УЗКС (кривая 1) и случая нагруженной УЗКС (кривая 2).

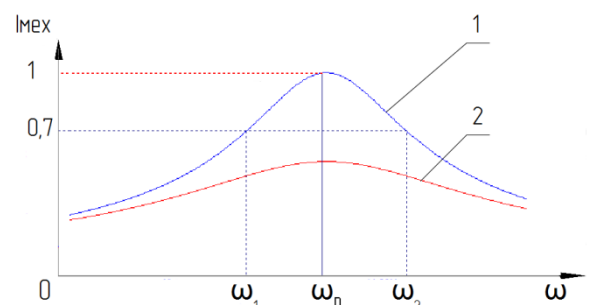


Рис. 4. Амплитудно-частотные характеристики тока механической ветви УЗКС

Для расчета добротности используется следующее выражение:

$$Q = \frac{\omega_p}{\omega_2 - \omega_1} \quad (12)$$

где ω - частота соответствующая максимуму на резонансной кривой, ω_1, ω_2 - частоты соответствующие амплитуде равной $\frac{1}{2}$.

Таким образом, описанная выше методика, позволяет определять численные значения элементов, определяющих свойства обрабатываемых сред.

V. ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ КОСВЕННОГО КОНТРОЛЯ ХАРАКТЕРИСТИК ОБРАБАТЫВАЕМЫХ СРЕД

Для практической реализации способа косвенного контроля параметров обрабатываемых сред была разработана структура системы контроля (измерительной части) ультразвукового электронного генератора, представленная на рис. 5.

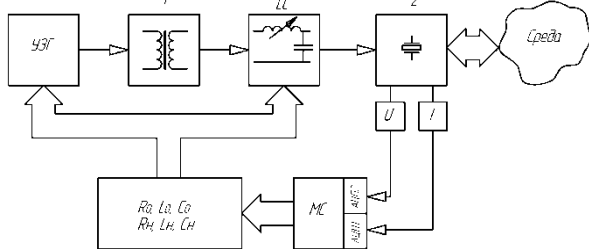


Рис. 5. Структурная схема измерительной части ультразвукового электронного генератора

В состав измерительной схемы входят блок выделения тока механической ветви (I), цепь измерения напряжения на пьезоэлементах УЗКС (U), и управляющий микроконтроллер (MC). Блок выделения тока механической состоит из токовых датчиков для тока, потребляемого УЗКС, тока, протекающего по опорной емкости, и дифференциального усилителя, осуществляющего вычитание емкостного тока из тока УЗКС. Полученная информация о напряжении на пьезоэлементах УЗКС, токе механической ветви и фазовых соотношениях этих сигналов, а также информация о наличии нагрузки УЗКС поступает на управляющий микроконтроллер который управляет частотой генератора, и производит выше описанные вычисления для случаев холостого хода и режима работы УЗКС при наличии нагрузки, а так же вырабатывает управляющие сигналы для блока согласования (LC) электронного генератора и УЗКС.

Процесс контроля параметров акустической нагрузки разделяется на два этапа: этап определения собственных эквивалентных параметров УЗКС и этап определения непосредственно параметров акустической нагрузки.

Этап определения собственных эквивалентных параметров УЗКС представлен в виде следующих действий (УЗКС должна работать в режиме холостого хода):

- Получение АЧХ тока механической ветви подключенной УЗКС;
- Определение по АЧХ значения $\omega_r, \omega_1, \omega_2$ и тока, соответствующего частоте ω_r , вычисление добротности по формуле (12);
- Измерение напряжения питания УЗКС на частоте ω_r и вычисление R_0 по формуле (1);

- Вычисление значения элементов L_0 и C_0 , используя формулы (3) и (5);

- Сохранение в энергонезависимой памяти микроконтроллера значений элементов R_0, L_0, C_0 для последующих расчетов R_n, L_n, C_n .

Этап определения параметров акустической нагрузки представлен в виде следующих действий (УЗКС работает в режиме нагрузки):

- Получения АЧХ тока механической ветви подключенной УЗКС;
- Определение значения $\omega_r, \omega_1, \omega_2$ и тока, соответствующий частоте ω_r по АЧХ, вычисление добротности по формуле (12);
- Измерение напряжения питания УЗКС на частоте ω_r и вычисление значения R_n по формуле (7);
- Вычисление значения элементов L_n и C_n используя формулы (8,9) и (10,11).

Предложенный способ может быть реализован в ультразвуковых технологических аппаратах с целью получения информации об обрабатываемой среде для управления процессом ультразвукового воздействия и корректировки согласующих цепей УЗГ в зависимости от акустической нагрузки на УЗКС.

VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный и разработанный способ косвенного контроля акустической нагрузки был практически апробирован в составе системы контроля ультразвукового аппарата, разработанного в Лаборатории акустических процессов и аппаратов Бийского технологического института, предназначенного для кавитационной обработки жидких сред и прошел лабораторные испытания. Измерения параметров пьезоэлектрической колебательной системы, проведенные при УЗ обработке различных жидкостей, позволили подтвердить возможность косвенного контроля величины и характера акустической нагрузки, подвергаемой ультразвуковому воздействию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Хмелев, В.Н. Применение ультразвука высокой интенсивности в промышленности / В.Н. Хмелев, А.Н. Сливин, Р.В. Барсуков, С.Н. Цыганок, А.В. Шалунов; Алт. гос. техн. ун-т, БТИ. – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2010. – 203с.
- [2] Донской А.В. Ультразвуковые электротехнологические установки Л.:Энергоиздат, 1982 208 с.
- [3] Хмелев В.Н., Согласование электронных генераторов с пьезоэлектрическими колебательными системами для повышения эффективности ультразвуковых аппаратов [Текст] / Хмелев В.Н., Генне Д.В., Барсуков Р.В., Цыганок С.Н., Шалунов А.В., Абраменко Д.С. // Известия Томского политехнического университета. 2010. Т. 317. № 4. С. 139-143.
- [4] Абраменко Д.С. Способ контроля амплитуды ультразвукового воздействия [Текст] / Хмелев В.Н, Абраменко Д.С. Барсуков Р.В., Шалунов А.В., Генне Д.В. //Журнал Датчики и системы, 2010. -- №12. – С. 43 – 47.